



大容量变换器 主电路开关暂态分析与EMI的研究

黄立培、孙旭东、李方正、陈名

清华大学电机工程与应用电子技术系

2008. 05. 16



主要内容

1. 概述
2. 实验装置介绍
3. 直流母线的建模
4. 电磁干扰传播通道的建模
5. 反并联二极管对IGBT开关暂态的影响
6. 小结与展望



1. 概述

◆ 申请书确定的研究内容

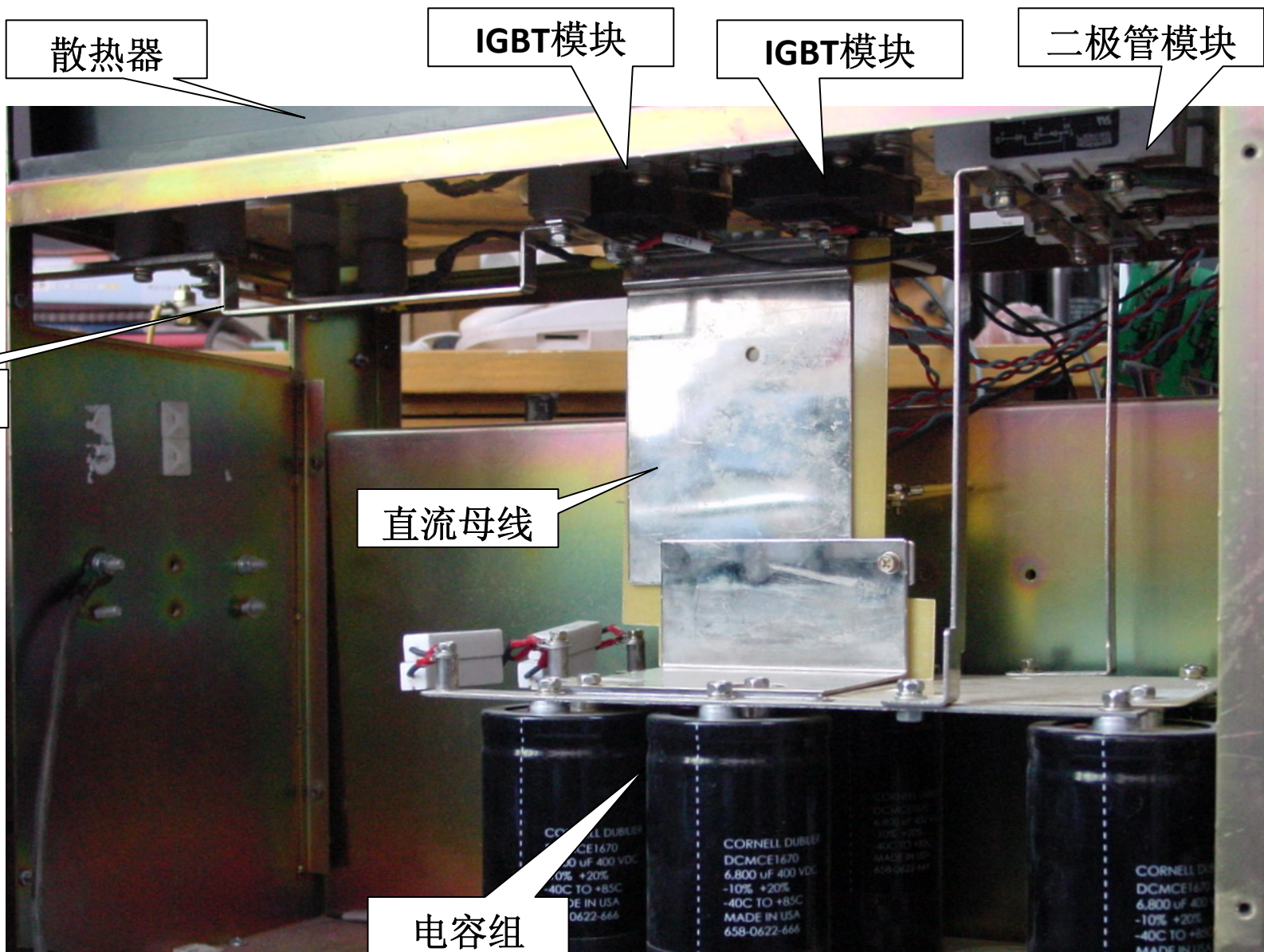
- 大容量电力电子变换器主电路开关暂态分析的电路模型
- 主电路拓扑中电磁暂态传播过程的研究
- 大容量变换器传导**EMI**的传播规律和抑制方法的研究

◆ 研究进展

- 实验装置研制
- 建模与验证方法研究
 - 直流母线建模（暂态波形验证）
 - 传播通道建模（外加激励验证）
- 反并联二极管对开关暂态的影响



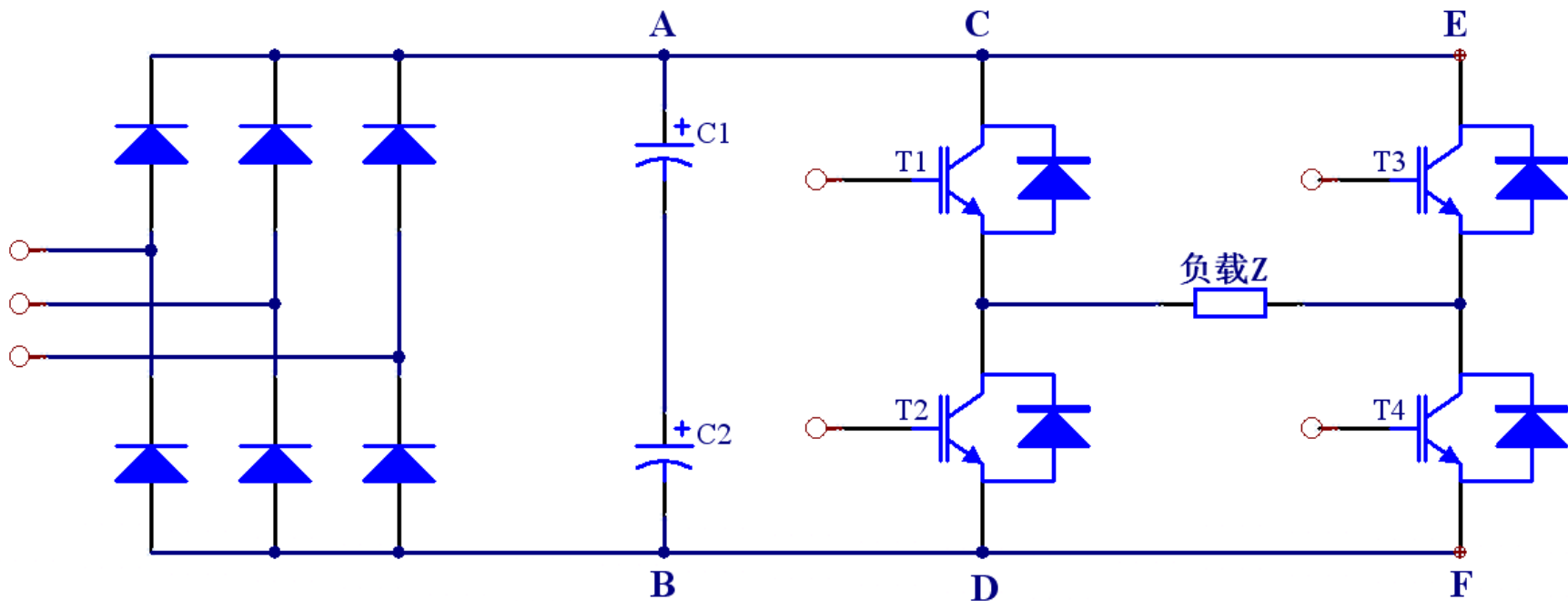
2. 实验装置介绍(H桥IGBT功率单元)





2. 实验装置介绍

◆ 实验装置的电路拓扑



- 整流二极管模块: SKKD162F/12 (1200 V/160 A)
- IGBT模块: CM300DY-24A (1200 V/300 A)
- 容量: 约100kVA



3. 直流母线的建模

2.1 直流母线的几何形状

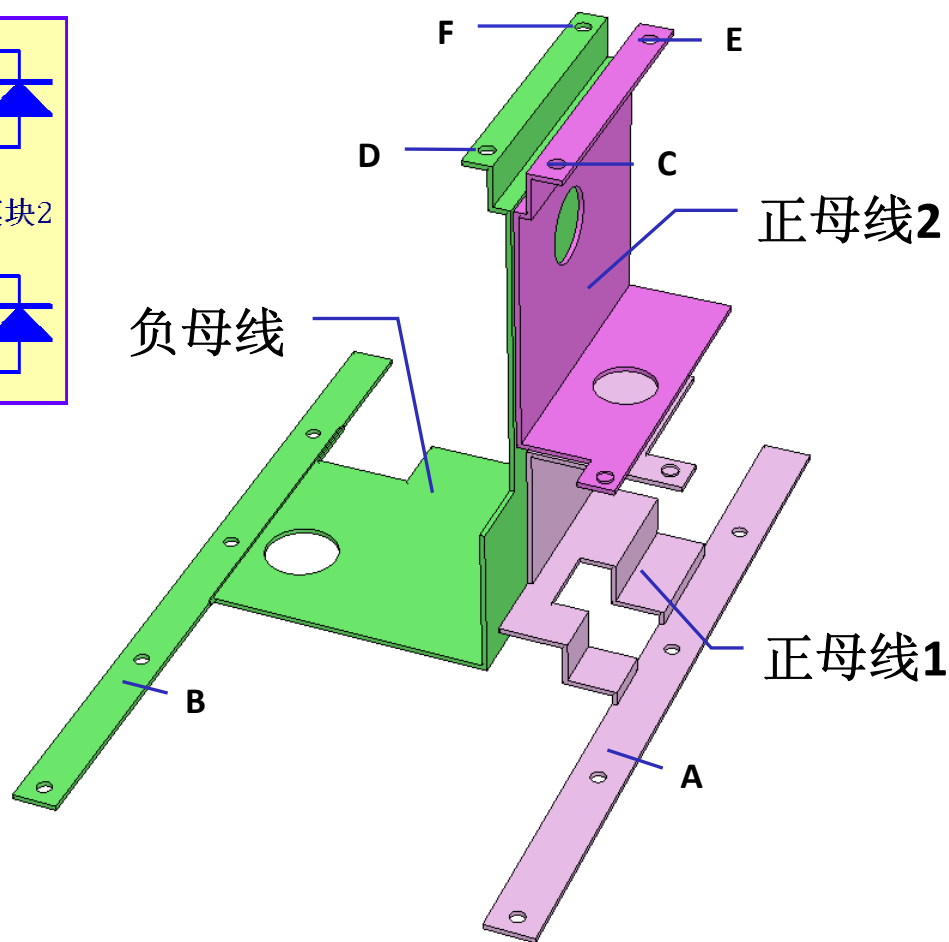
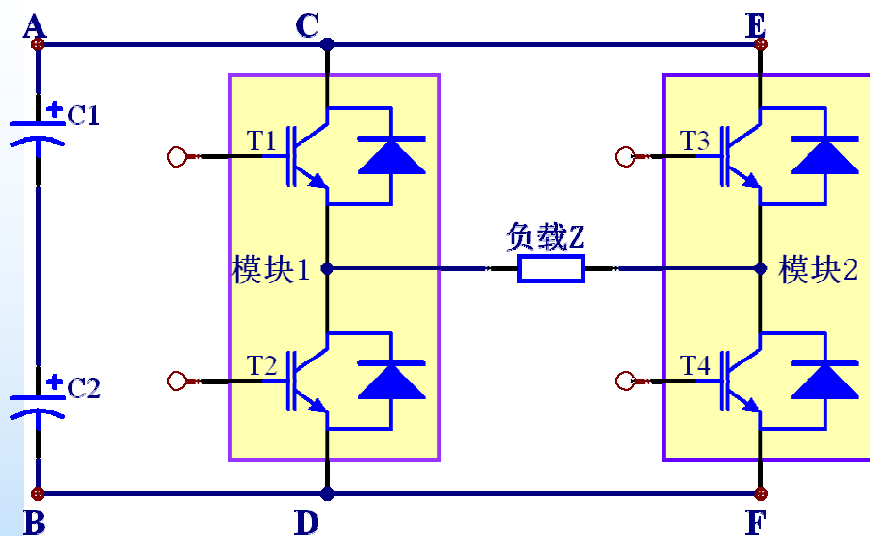
2.2 物理模型的简化

2.3 直流母线的PEEC模型

2.4 PEEC模型的仿真与分析

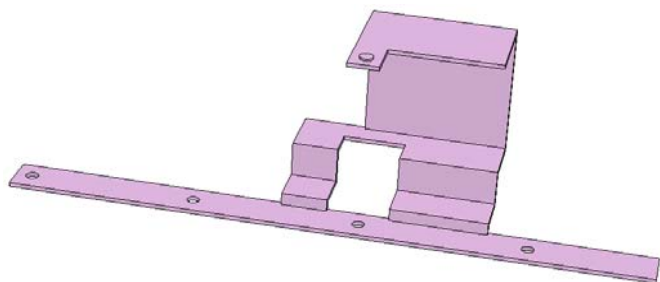


3.1 直流母线的几何形状

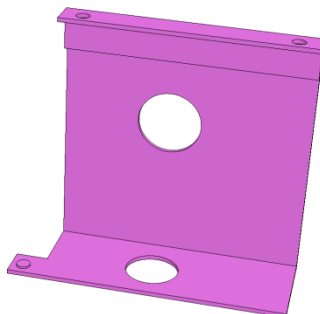




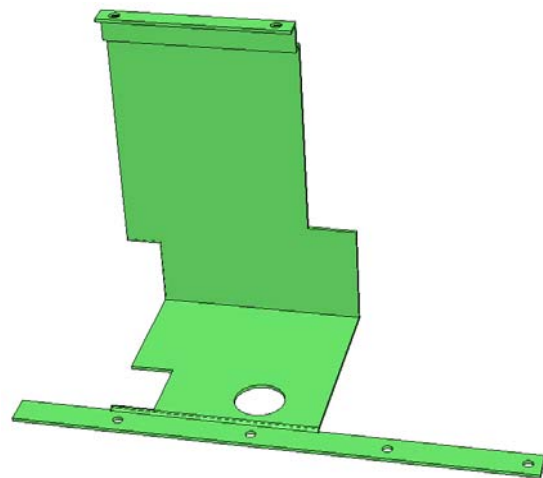
3.1 直流母线的几何形状



正母线1



正母线2



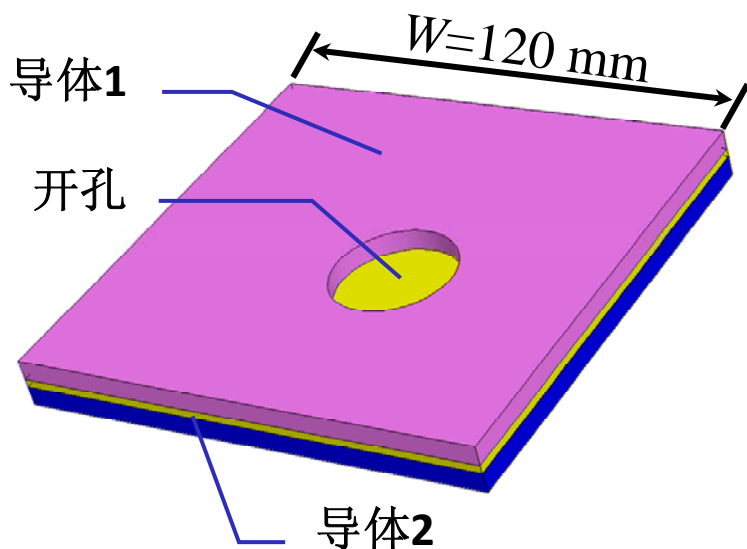
负母线

- 母线所用材料为2 mm厚的铜板
- 直流电容接线排尺寸为200 mm×20 mm
- 正母线1高85 mm，主体部分最大宽度为70 mm
- 正母线2高120 mm，宽115 mm
- 负母线高210 mm，主体部分最大宽度为115 mm
- 最大开孔直径30 mm，开槽尺寸20 mm×20 mm



3.2 物理模型的简化

◆ 开孔的简化



开孔对部分参数的影响 (30MHz)

	$D=0$	$D=30 \text{ mm}$	变化
C_1/pF	4.914	4.909	0.1%
C_{12}/pF	591	558	5.6%
L_1/nH	31.43	31.83	1.3%
M_{12}/nH	31.03	30.93	2.9%
$R_1/\text{m}\Omega$	0.845	0.945	12%

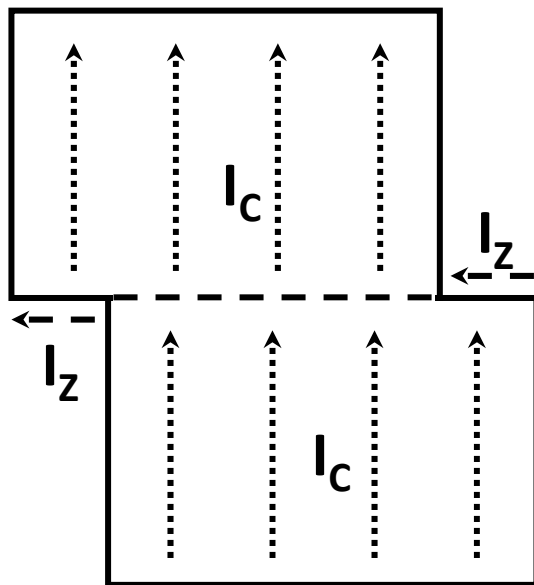
R_1 、 L_1 、 C_1 为导体1的电阻、自感和自电容
 L_{12} 、 C_{12} 为导体之间的互感和电容

- ✓ 开孔不大时 ($W/D < 0.4$) 主要影响电阻，对部分电容和部分电感影响较小。
- ✓ 当电感的变化可以忽略时，不考虑开孔。



3.2 物理模型的简化

◆ 截面交错的简化

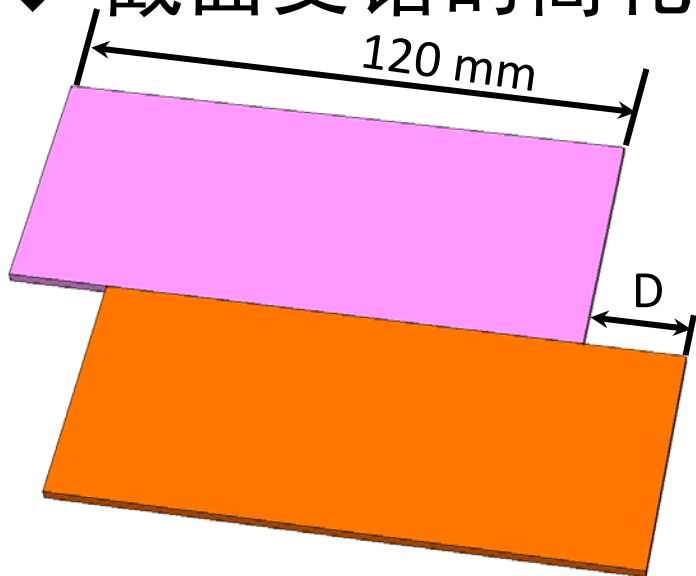


- ✓ 高频情况下，认为截面交错位置的电流集中在分界面上。
- ✓ 研究交错界面两侧导体的电感可不考虑电流 I_z 的影响。



3.2 物理模型的简化

◆ 截面交错的简化



截面交错对部分参数的影响 (30MHz)

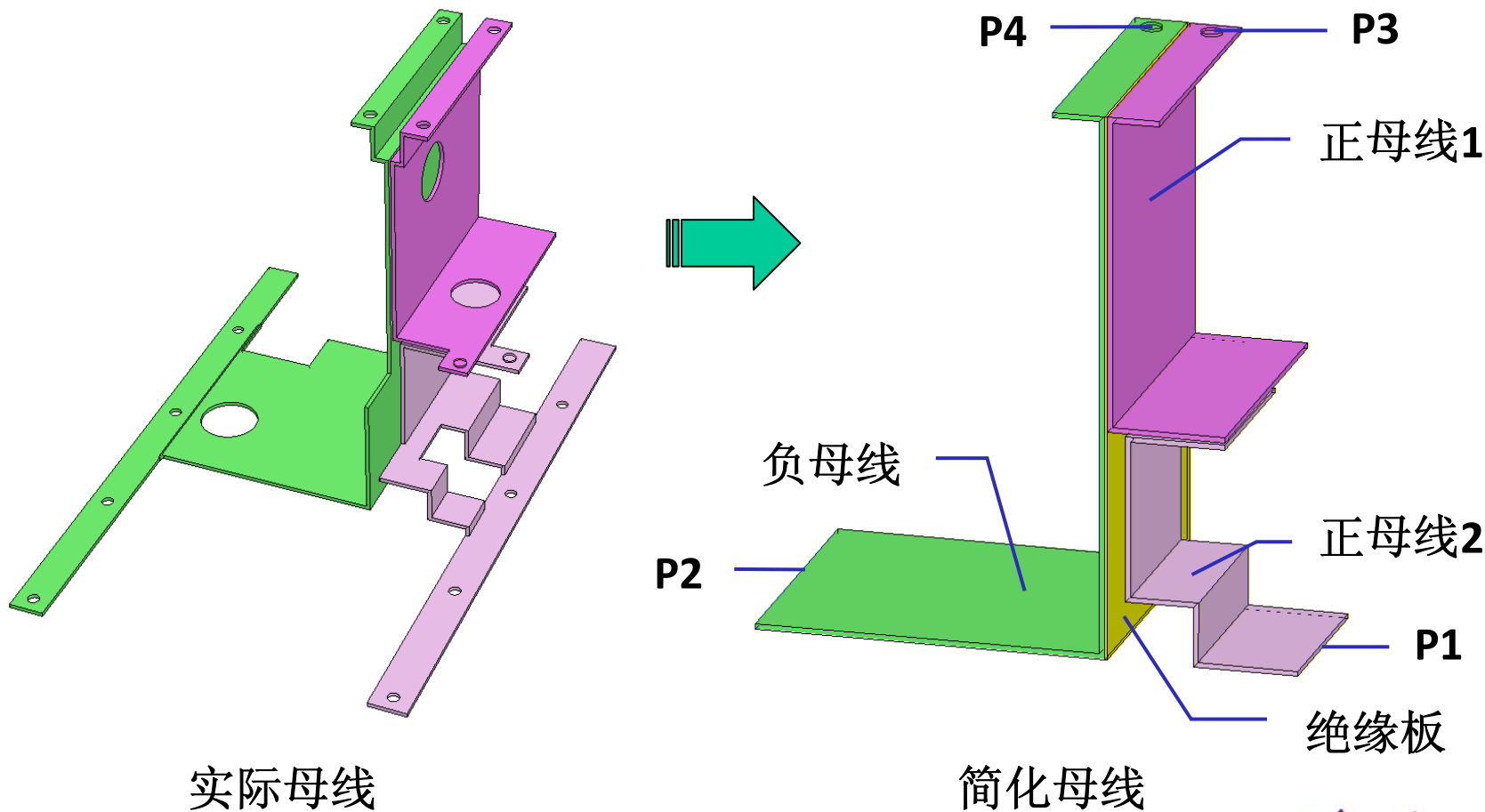
	$D=0$	$D=20\text{ mm}$	变化
C/pF	4.55	4.65	2.2%
L/nH	25.1	24.2	3.7%
$R/\text{m}\Omega$	1.28	1.42	10.9%

- ✓ 截面交错主要影响电阻的大小，而高频时电阻对电路影响相对电感小得多。
- ✓ 忽略母线结构中的截面变化并不会对整个电路模型的精度造成太大影响。



3.3 直流母线的PEEC模型

◆ 直流母线简化模型





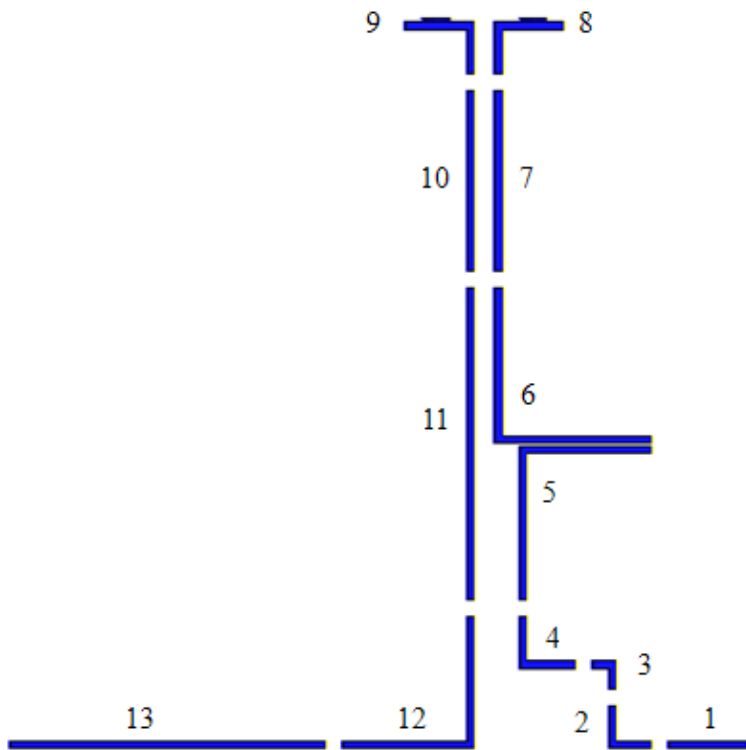
3.3 直流母线的PEEC模型

- ◆ 部分单元划分一般原则
 - 电容单元划分的最大尺寸
 - 小于实验装置最大尺寸对应的最小波长的**1/20**
 - 电感单元划分为直导体
 - 便于自感和互感计算，
 - 电感单元需要与电容单元之间错开半个单元尺寸
 - 互电容连接在电容单元的中点

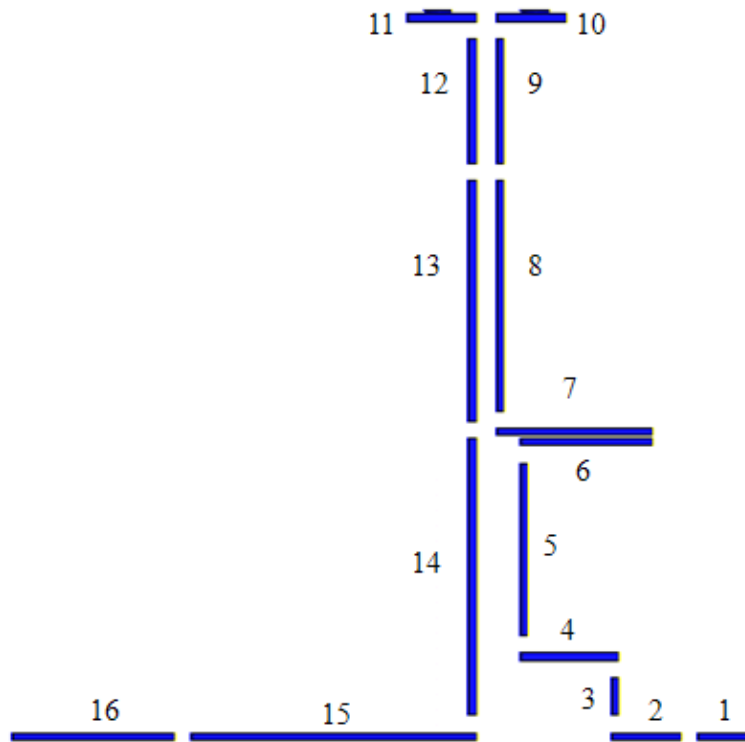


3.3 直流母线的PEEC模型

◆ 单元划分



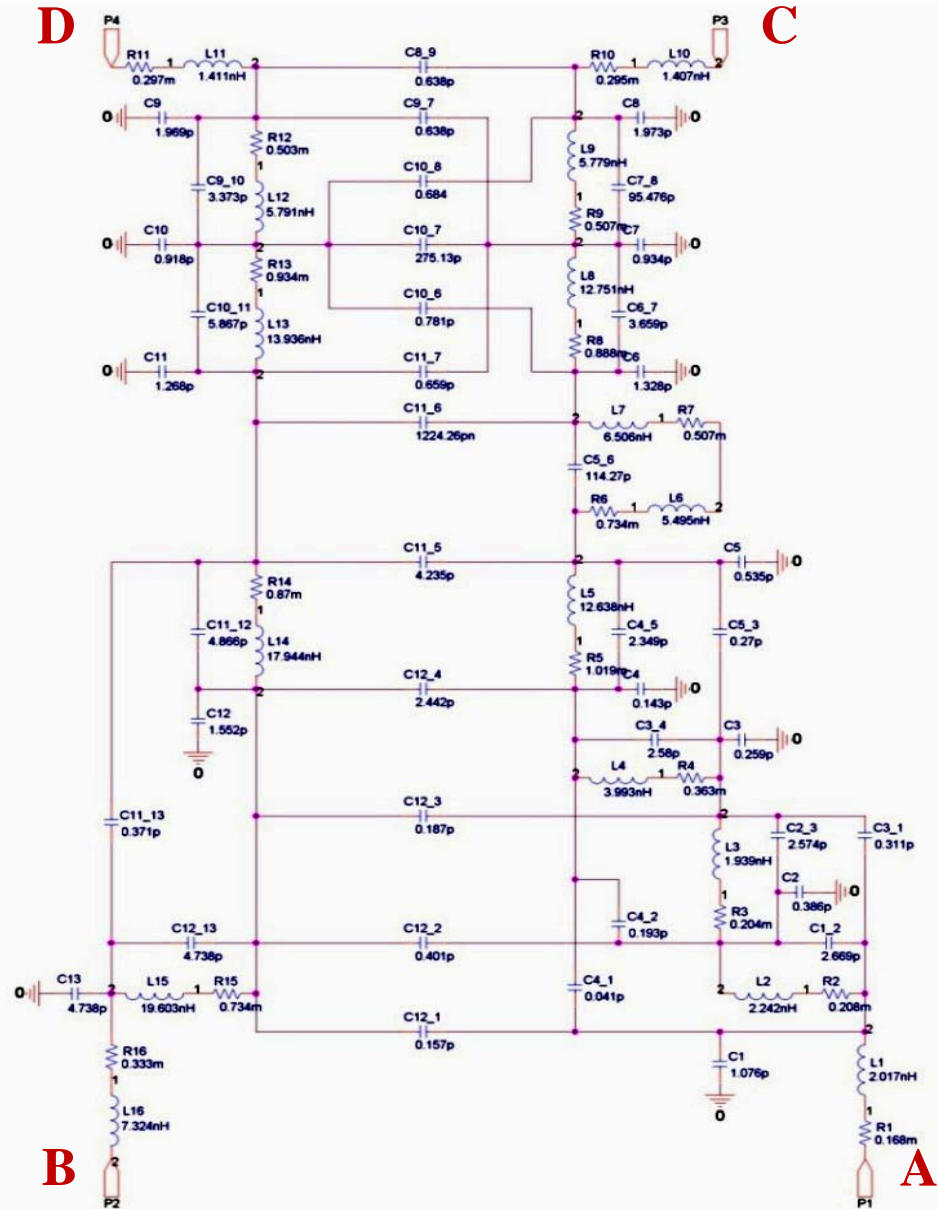
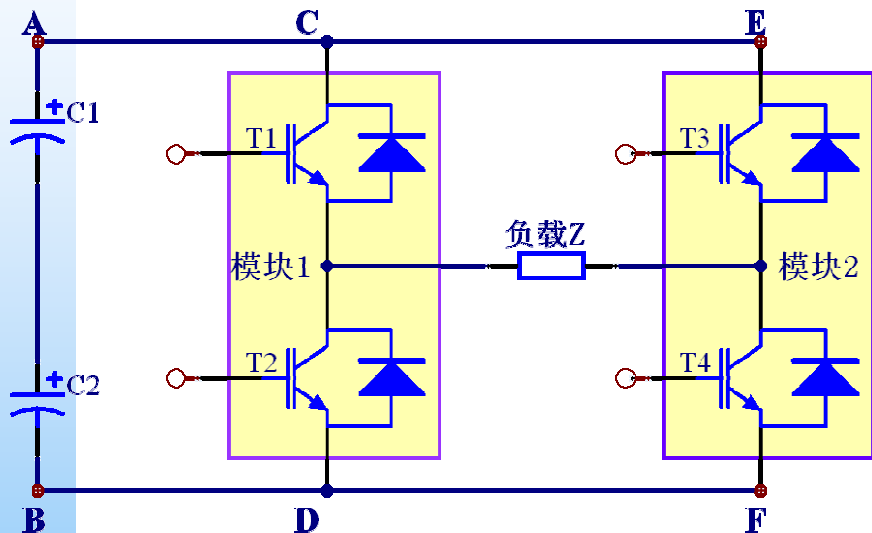
电容单元划分



电感单元划分



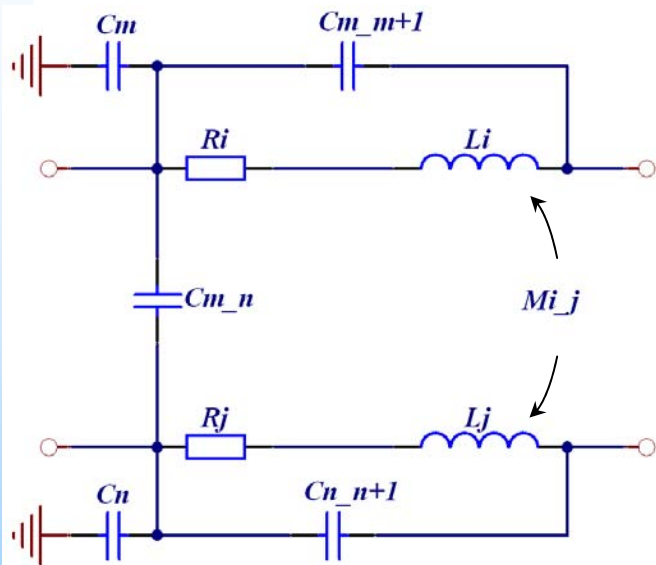
3.3 直流母线的PEEC模型



- A、B接直流母线电容
- C、D接IGBT模块



3.3 直流母线的PEEC模型



- ◆ R_i 、 L_i 和 R_j 、 L_j : 电感单元 i 、 j 的电阻和自电感
- ◆ C_m 、 C_n : 电感单元 i 、 j 对应的电容单元 m 、 n 的自电容
- ◆ M_{i_j} : 电感单元 i 、 j 之间的互感
- ◆ C_{m_n} : 电容单元 m 、 n 间的互电容
- ◆ $C_{m_{m+1}}$ 、 $C_{n_{n+1}}$: 电容单元 m 、 n 与其相邻电容单元间的互电容



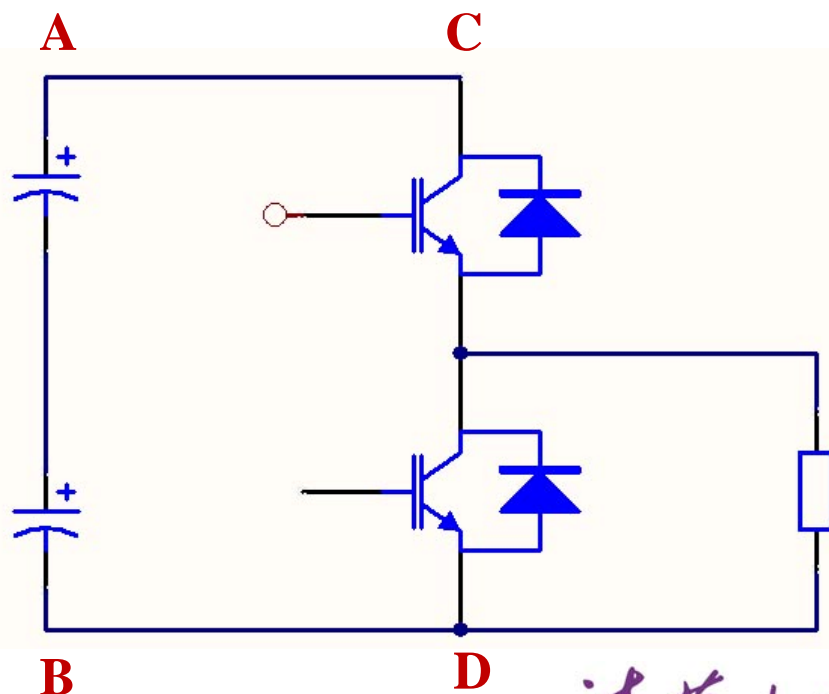
3.4 PEEC模型的仿真与分析

◆ 模型验证——实验与仿真对比

➤ 以开关暂态过程中器件端母线电压 (U_{CD}) 作为激励，用电路仿真软件 **Pspice** 对等效电路进行仿真，将仿真结果与实验测得的电流数据进行比较。

➤ 单桥臂实验电路

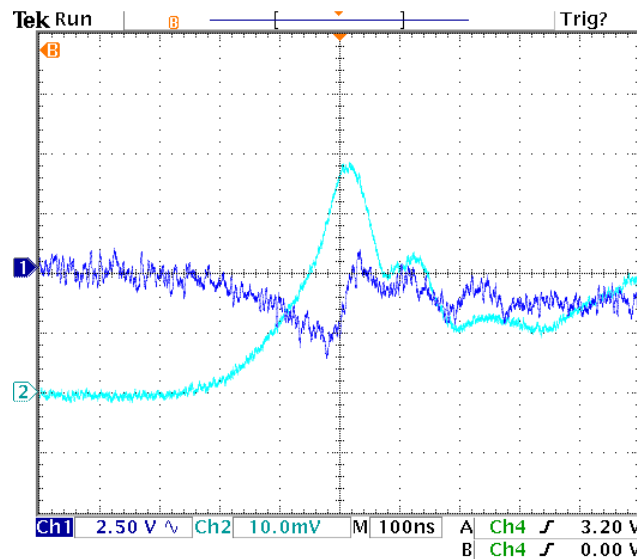
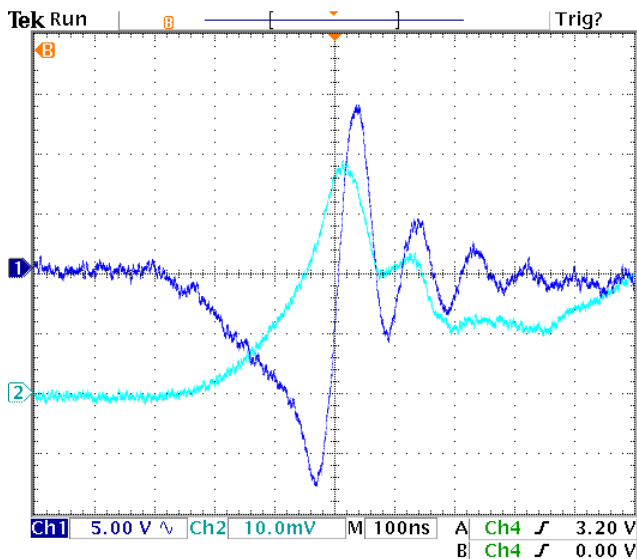
- 母线稳态电压 **300 V**
- 负载约为 **11 Ω** (感性)
- 下管负偏压、驱动上管





3.4 PEEC模型的仿真与分析

◆ 实验波形



(a) 母线电流和器件端电压 (交流分量) (b) 母线电流和电容端电压(交流分量)
CH1—5V/格, CH2—5A/格 CH1—2.5V/格, CH2—5A/格

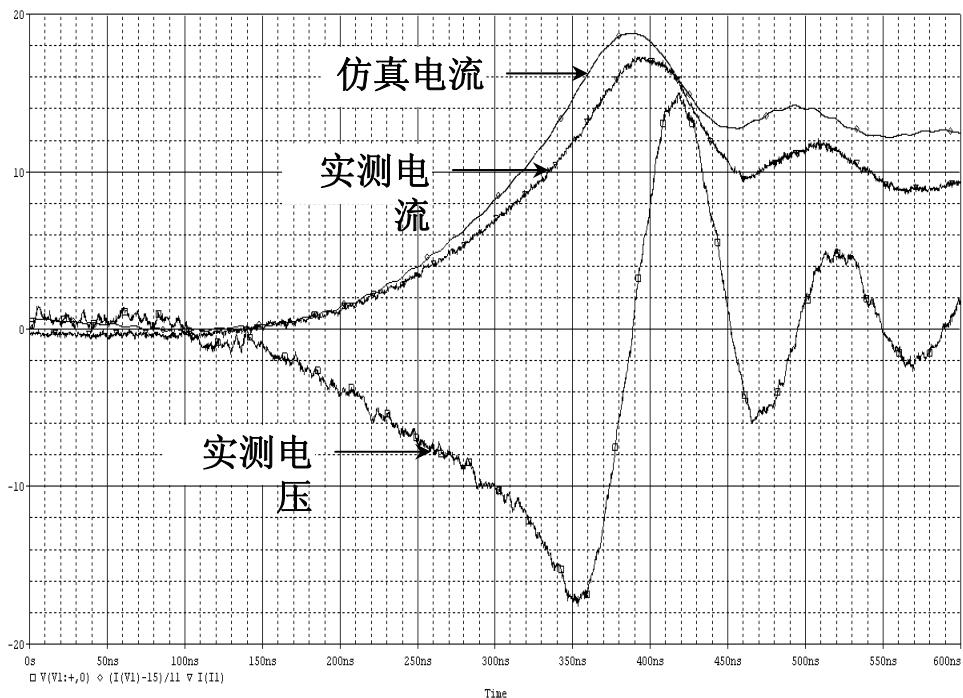
- ✓ 在IGBT开通的暂态过程中, 母线上出现了较大的电流和电压波动
- ✓ 直流母线电容上的电压变化小于1%, 可以认为是一个恒定电压源



3.4 PEEC模型的仿真与分析

◆ 仿真分析

- 仿真电路中，将实测桥臂电压作为激励，电容连接端短接（看作直流电压源），对比直流母线电流的仿真与实测波形





3.4 PEEC模型的仿真与分析

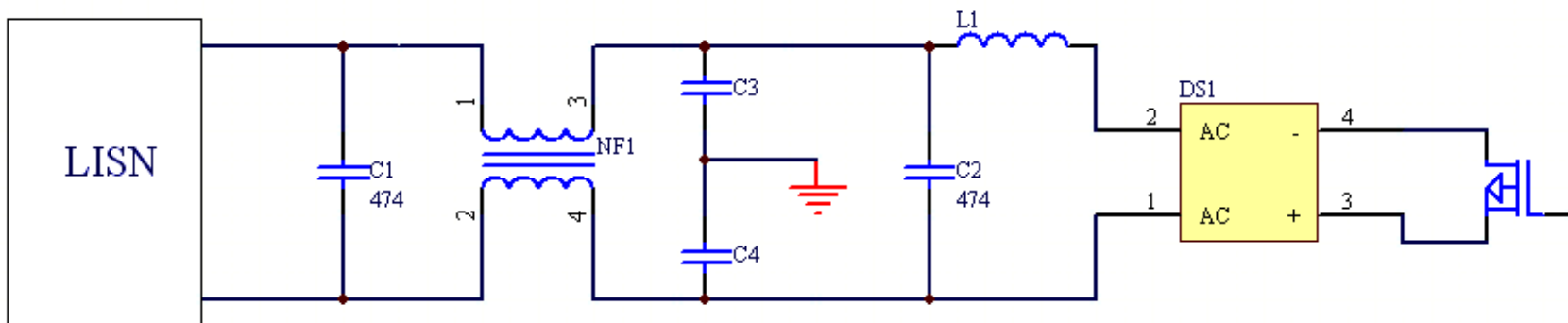
◆ 仿真分析

- 仿真波形与实测波形形状近似，说明等效电路比较准确，用**PEEC**方法获取大尺寸连接导体杂散参数是可行和有效的。
- 简化之后的模型具有合理的精度。
- 模型简化不可避免造成等效电路精度的降低，简化模型对电路参数、模型精度的影响程度有待进一步研究。



4. 以外加激励方式研究EMI传播通道

- ◆ 以PFC电路为例，以外加脉冲激励的方法，研究传播通道的建模及脉冲传播方式。
- ◆ EMI传播通道实验电路

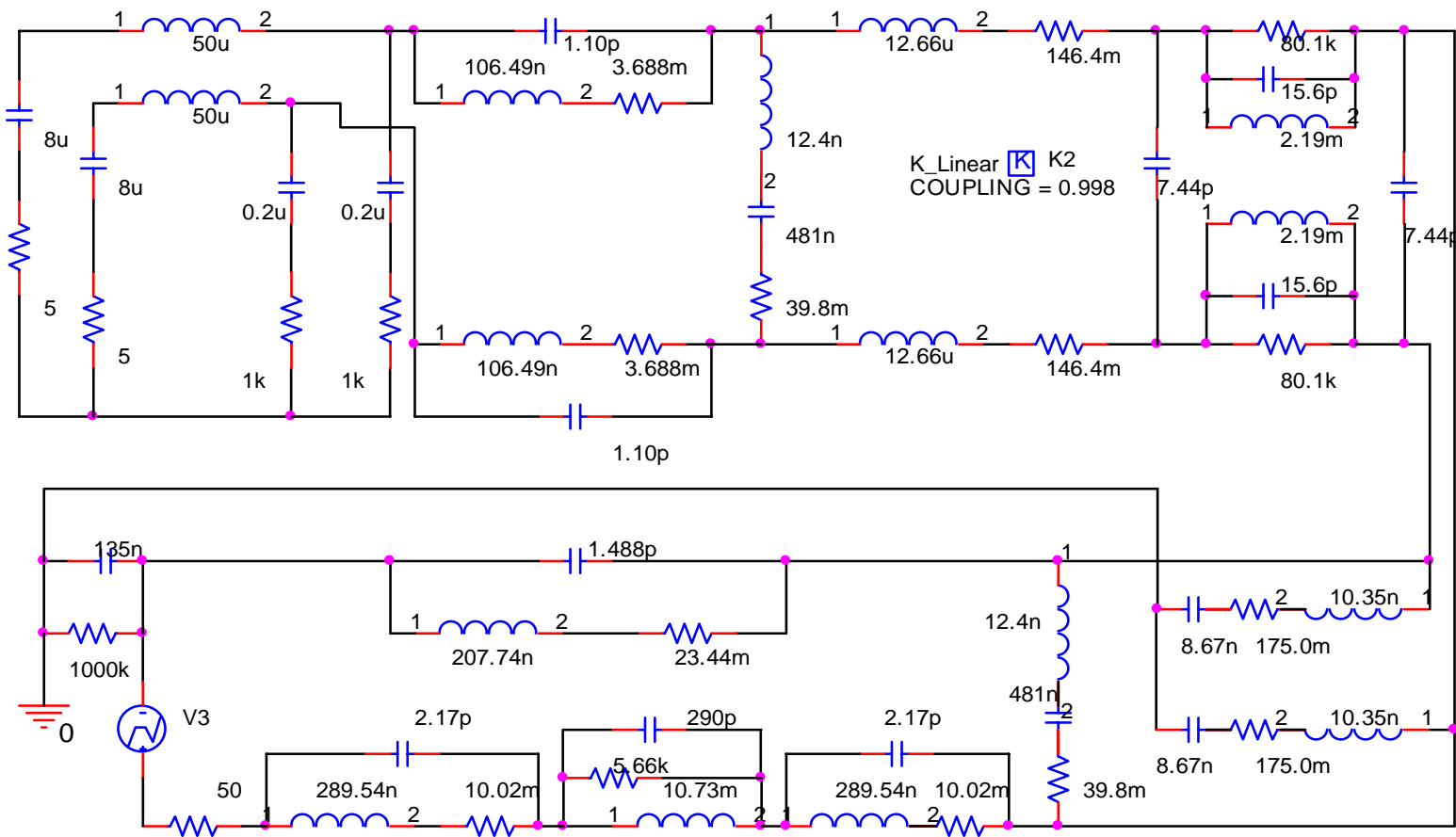


- ◆ 采用阻抗分析仪HP4395A测量各个元件的阻抗频率特性，拟合出等效电路参数。
- ◆ 近似认为整流桥的输出端和输入端处于直通状态。



4. 以外加激励方式研究EMI传播通道

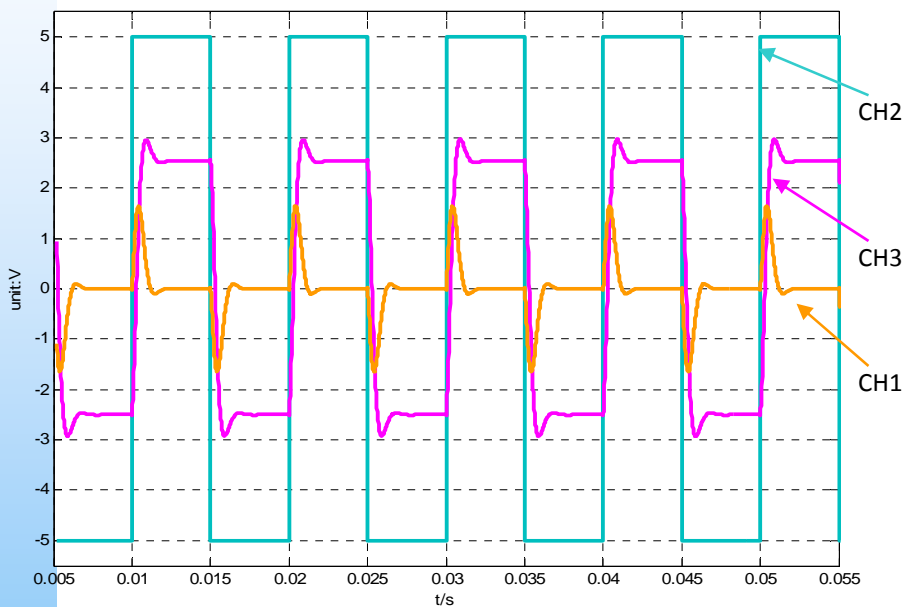
◆ 传播通道的高频等效电路



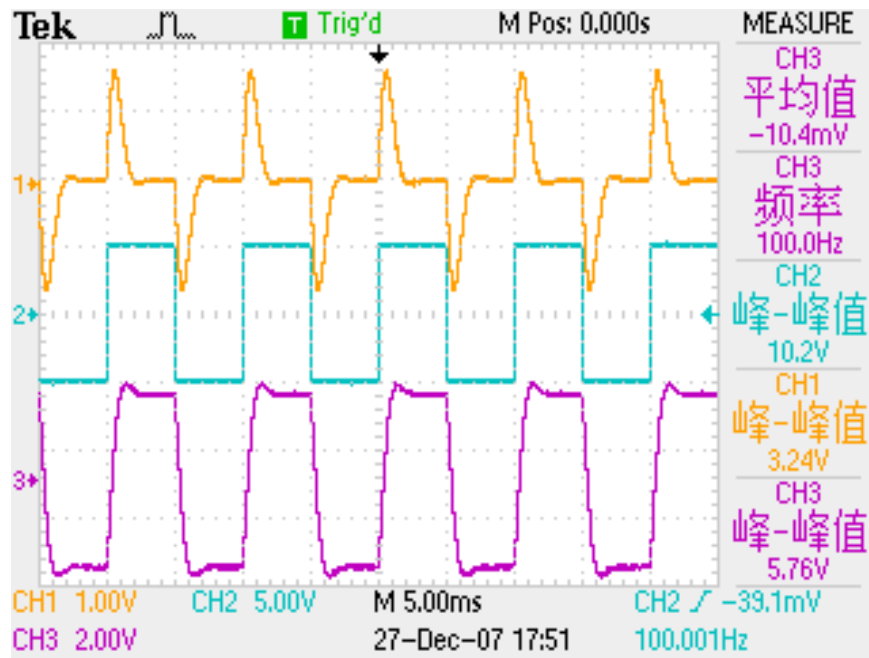


4. 以外加激励方式研究EMI传播通道

◆ 仿真与实验



仿真波形



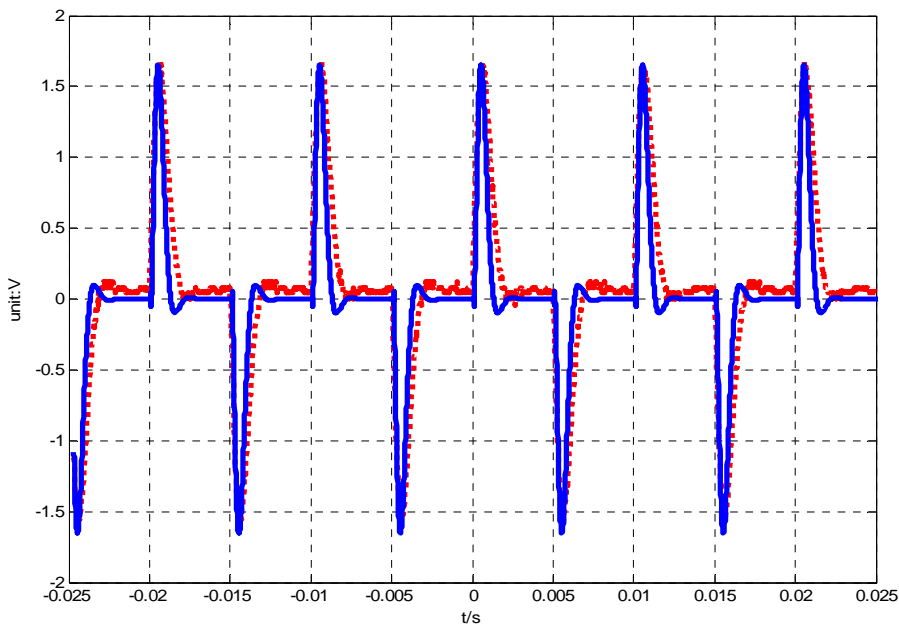
实验波形

- CH1: LISN上1kΩ电阻的电压波形
- CH2: EMI干扰源输入信号
- CH3: 输入到LISN的电压波形

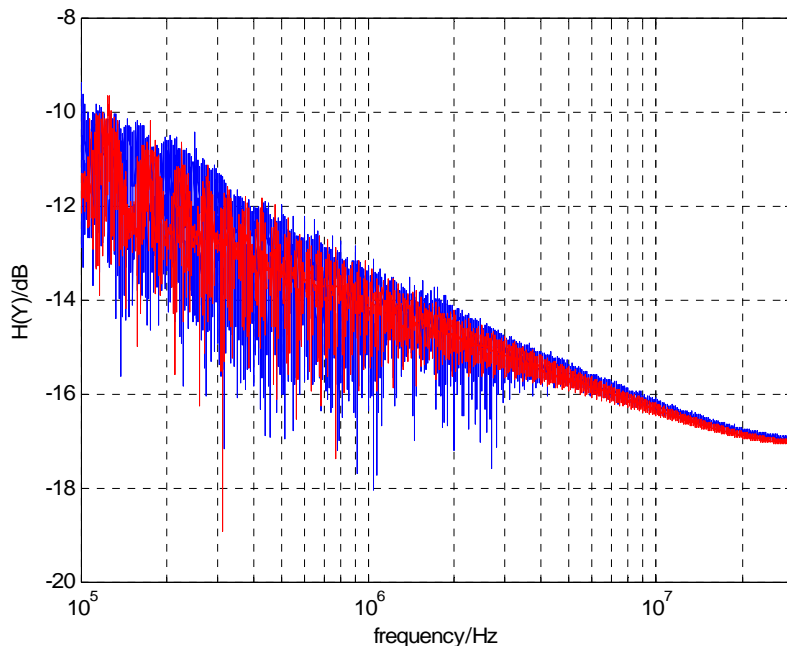


4. 以外加激励方式研究EMI传播通道

◆ LISN上1kΩ电阻的电压波形与频谱



— 测量波形
- - - 仿真波形



— 测量波形的频谱
- - - 仿真波形的频谱

✓ 仿真和实验测量得到的电压波形基本一致

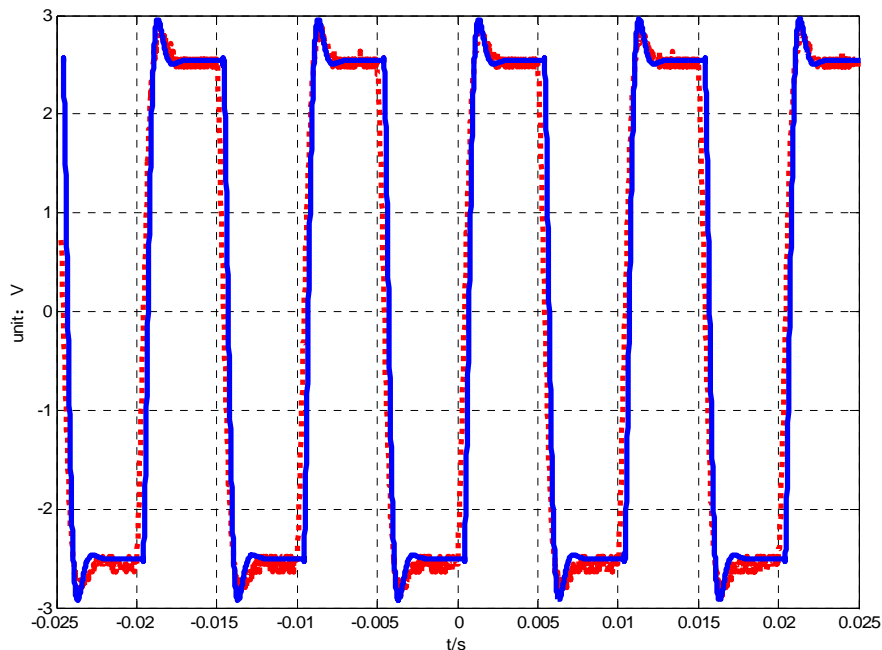
✓ 在150kHz~30MHz的频率范围内，频谱吻合较好

清华大学

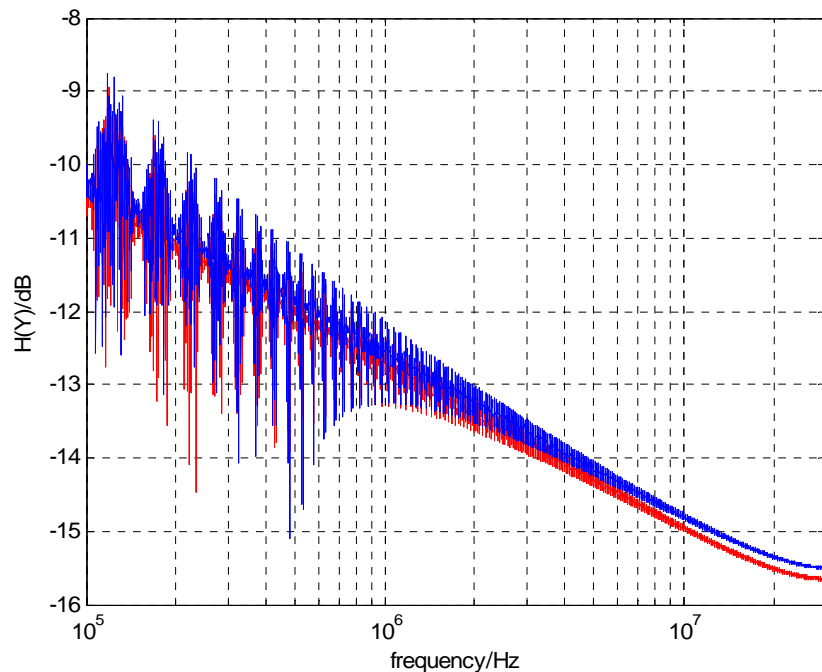


4. 以外加激励方式研究EMI传播通道

◆ LISN上输入电压波形与频谱



— 测量波形
— 仿真波形



— 测量波形的频谱
— 仿真波形的频谱

✓ 电压波形十分一致

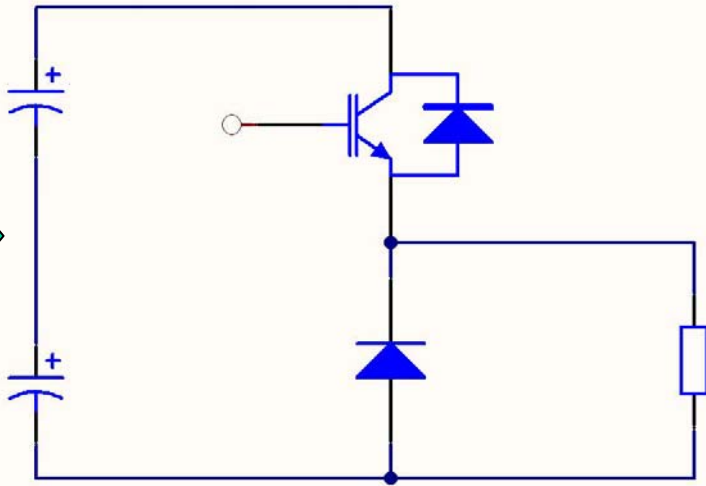
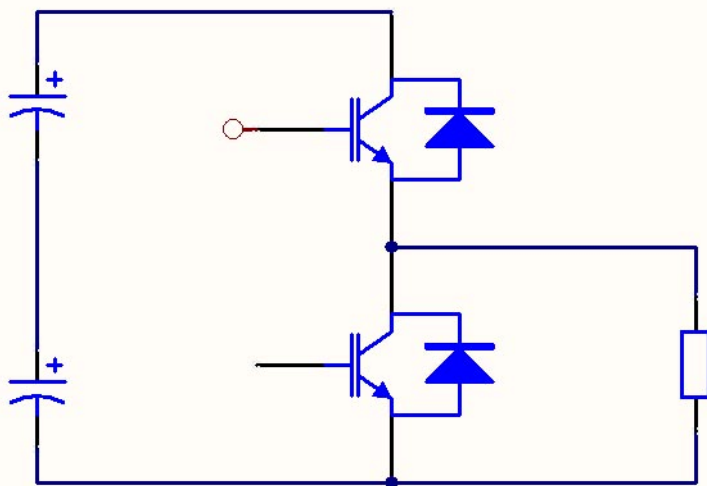
✓ 在150kHz~30MHz的频率范围内，频谱基本吻合

清华大学



5. 反并联二极管对IGBT开关暂态的影响

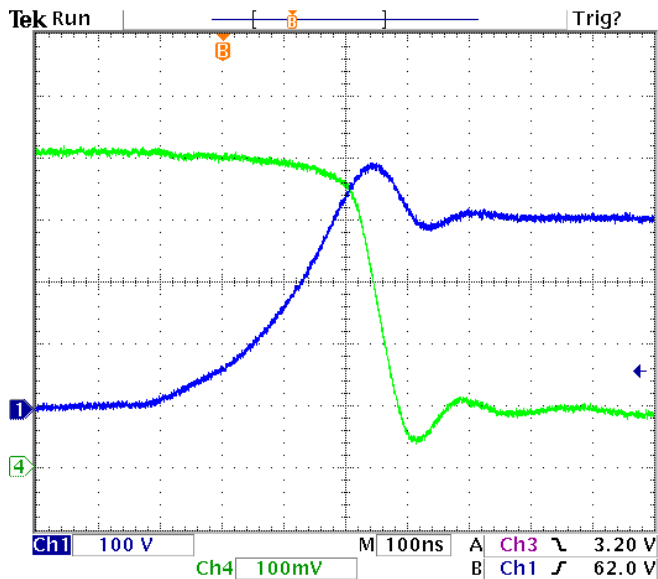
- ◆ 在开关暂态过程中，IGBT等开关器件两端的电压和电流突变（ dv/dt 和 di/dt ）是EMI的主要干扰源。
- ◆ 器件的反并联二极管对器件的暂态过程有较大影响
- ◆ 单桥臂实验电路
 - 母线稳态电压300 V，负载约为11 Ω （感性）
 - 下管负偏压、驱动上管



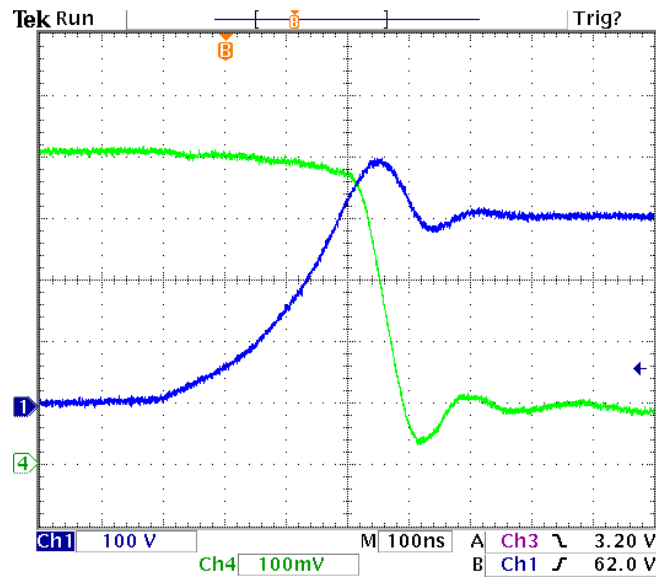


5. 反并联二极管对IGBT开关暂态的影响

◆对IGBT关断的影响



(a) t_{rr} 为110ns时
CH1—100V/格, CH4—5A/格



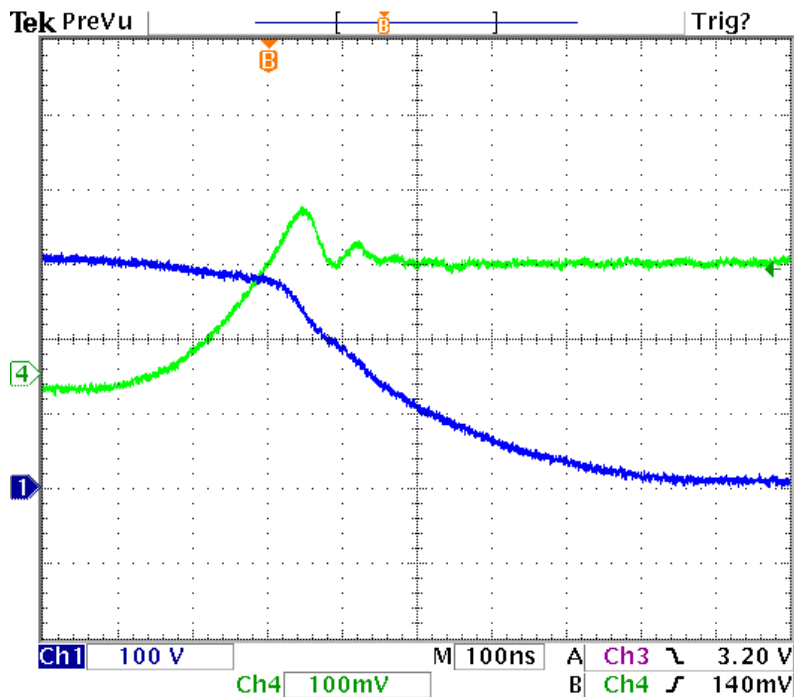
(b) t_{rr} 约为1us时
CH1—100V/格, CH4—5A/格

✓ 不同反向恢复时间的二极管对IGBT关断的影响几乎一样

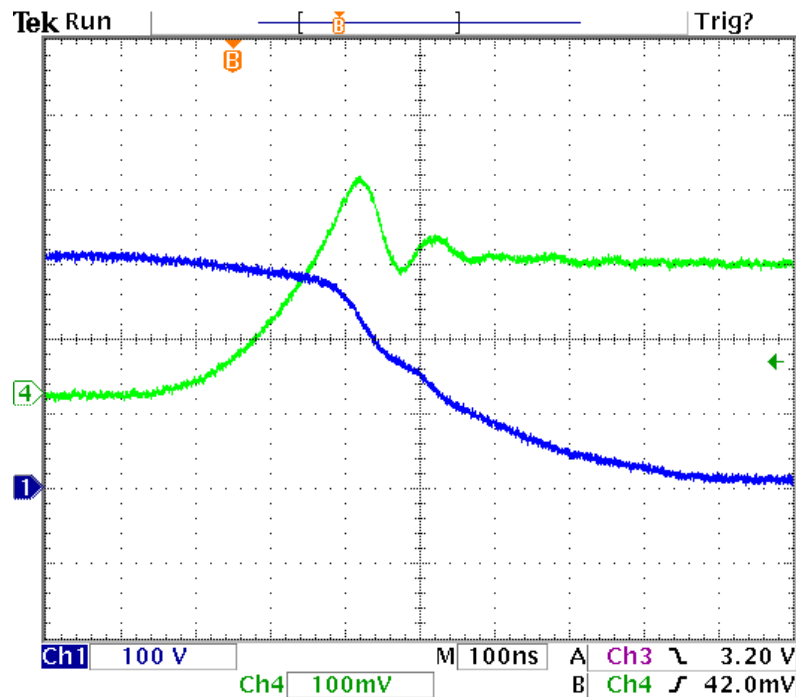


5. 反并联二极管对IGBT开关暂态的影响

◆对IGBT开通的影响



(a) 下桥臂使用CM50DY (t_{rr} 为80ns)
CH1—100V/格, CH4—5A/格

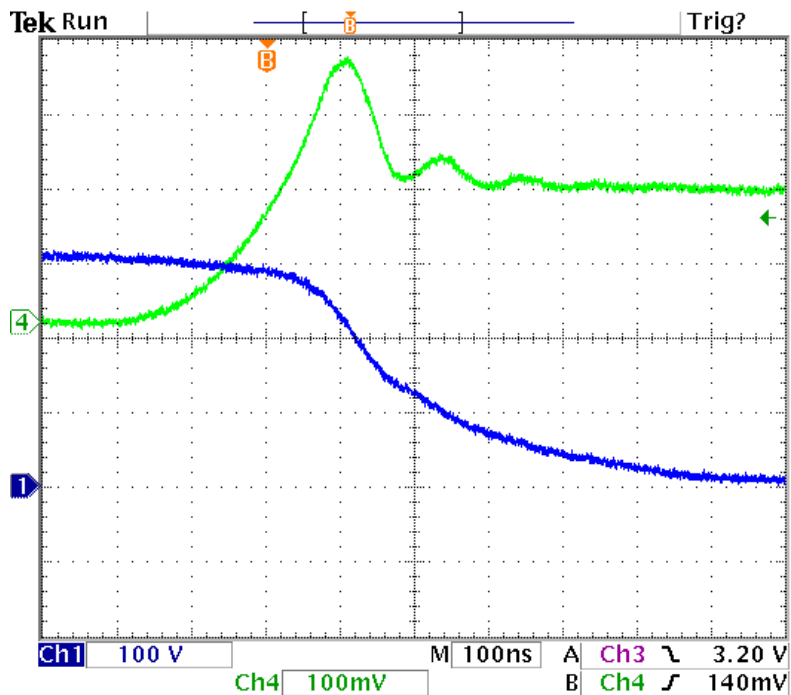


b) 下桥臂使用SKM50GB (t_{rr} 为110ns)
CH1—100V/格, CH4—5A/格

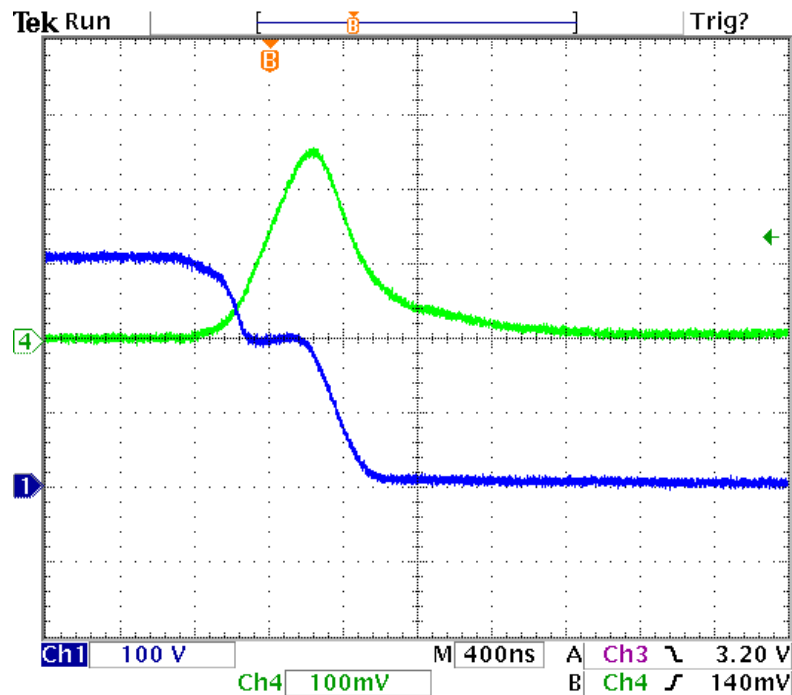


5. 反并联二极管对IGBT开关暂态的影响

◆对IGBT开通的影响



(c) 下桥臂使用CM300DY (t_{rr} 为170ns)
CH1—100V/格, CH4—5A/格



(d) 下桥臂使用DD110F (t_{rr} 为大于1us)
CH1—100V/格, CH4—50A/格



5. 反并联二极管对IGBT开关暂态的影响

◆对IGBT开通的影响

下桥臂器件	t_{rr}	IGBT电流峰值	di/dt
CM50DY	80ns	11A	70A/us、-95A/us
SKM50GB	110ns	16A	85A/us、-115A/us
CM300DY	170ns	18A	120A/us、-140A/us
DD110F	>1us	170A	290A/us、-320A/us

- ✓ 反向恢复时间越长， di/dt 越大，EMI越严重。
- ✓ 随反向恢复时间变长，IGBT的电流峰值显著增加，持续时间增长，导致开关损耗增加。



6. 小结与展望 (1)

1. 研制的H桥单元的实验装置可以作为研究大容量变频器开关暂态过程的实验平台。
2. 用PEEC方法建立了一台H桥单元的直流母线的等效电路，仿真与实验结果验证了模型的准确性，说明用PEEC方法获取大尺寸导体的杂散参数是可行的。
3. 大尺寸母线结构中的开孔（开槽）、沿电流方向的截面突变等对电阻的影响较大，对部分电容和部分电感等杂散参数的影响相对较小。



6. 小结与展望 (2)

4. 基于阻抗测量提取无源器件的高频模型参数，建立了PFC传播通道的等效电路模型。通过比较在LISN上仿真和测量得到的电压波形及其在150kHz~30MHz频率范围内的频谱，验证了模型的有效性和基于测量得到传播通道的高频等效电路的建模方法。
5. 反并联二极管的反向恢复时间对IGBT的开关暂态有重要影响。随着反向恢复时间的增加，IGBT开通过程中产生的 di/dt 相应变大，EMI越来越更加严重。同时IGBT的电流峰值显著增加，持续时间增长，导致开关损耗增加。



谢谢!